Energies renouvelables

Stockage de l’énergie (électrique)

Stockage de l’énergie

- **1 Intermittence**
- 2 Demand response
- 3 Stockage d’énergie vs réserve de puissance
- 4 Batteries
- 5 Energie hydraulique et stockage
- 6 Air comprimé
- 7 Hydrogène & P2G

Energie et intermittence

Sources d’énergie renouvelables et intermittence

- Géothermie 
- Biomasse
- Solaire thermodynamique 
- Hydraulique 
- Solaire photovoltaïque 
- Eolien 

En Belgique

Intermittence

- Problème et solution:
  - Certaines ressources fournissent l'électricité de manière intermittente:
    - Production parfois insuffisante
    - Production parfois en surplus
  - Cela amène un problème d'adéquation production-consommation et des fluctuations de prix importantes sur le marché de l'électricité (intraday essentiellement)
  - Une solution est donc de
    - Stocker l'énergie produite en cas de production en surplus
    - Restituer l'énergie stockée en cas de production trop faible

Intermittence

- Stockage: pas l'unique solution
  - Stockage = problème de l'intermittence géré du côté de la production
  - On peut aussi trouver des solutions du côté de la consommation: c'est le concept de « demand response »
    - La demande s'adapte à la production
    - Ceci se fait via un signal de prix envoyé aux compteurs intelligents
    - Les compteurs intelligents donnent alors cette information aux appareils présentant de la flexibilité (éventuellement via un organe de contrôle intermédiaire)
  - Appareils présentant une flexibilité intéressante:
    - Frigo/congélateur
    - Boiler électrique
    - Climatisation
    - Chauffage électrique (pompe à chaleur ou à accumulation)
    - Lave-vaisselle
    - Machine à laver
    - Sèche-linge
    - Stations de recharge domestique de véhicules électriques

Stockage de l'énergie

- 1 Intermittence
- **2 Demand response**
- 3 Stockage d'énergie vs réserve de puissance
- 4 Batteries
- 5 Energie hydraulique et stockage
- 6 Air comprimé
- 7 Hydrogène & P2G

Demand response

- Demand response : concept central du smart grid

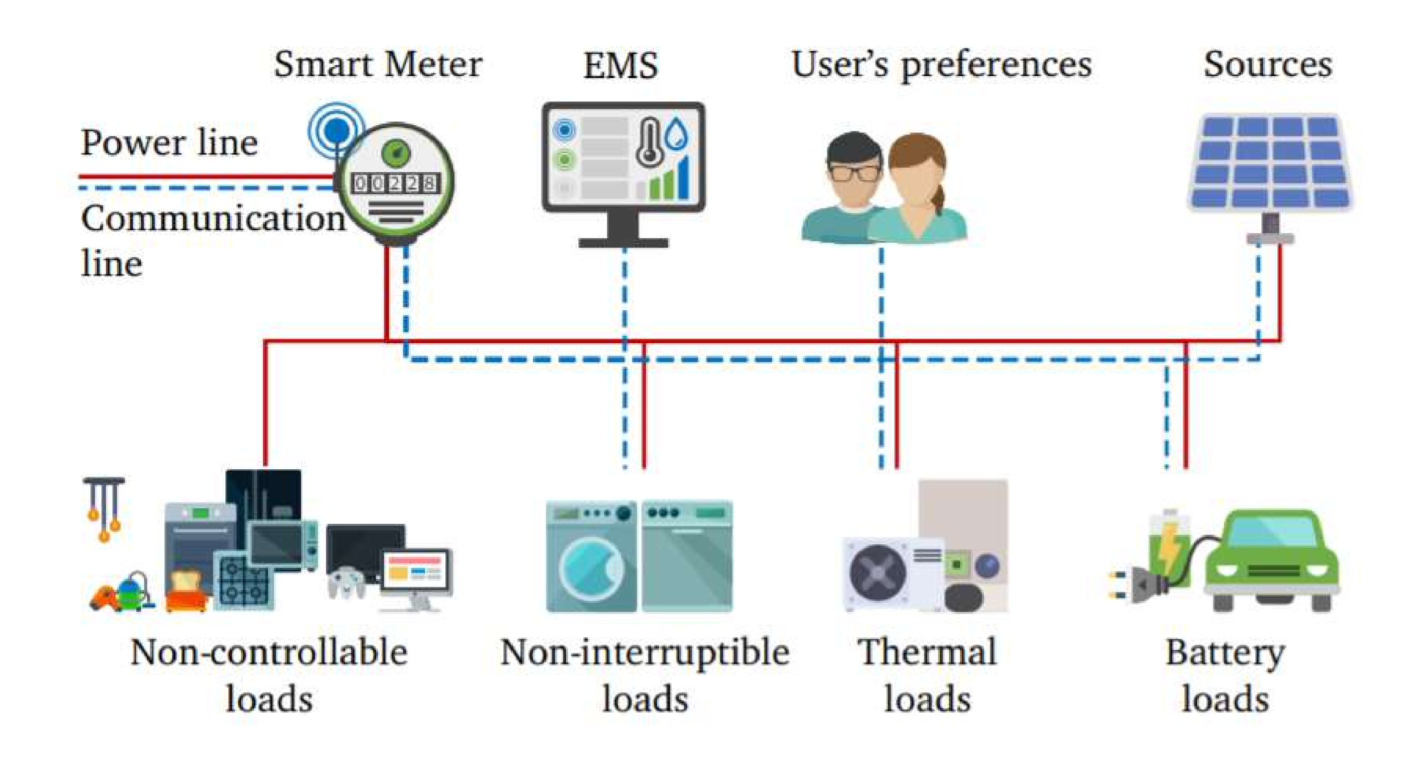
https://www.youtube.com/watch?v=Gl1k-MoJNkk

Demand response

- Conclusions de la vidéo
  - Historiquement, la production suivait la consommation. La consommation n’avait aucune implication dans la gestion du réseau.
  - L’électricité n’est pas facilement stockable. L’équilibre entre consommation et production doit être respecté en tout temps.
  - Les usages de l’électricité évoluent avec l’apparition de nouvelles charges électriques: véhicules électriques, pompes à chaleur, etc.
  - Une gestion plus active de la demande permet d’assurer l’équilibre entre consommation et production: c’est le concept de demand response. La consommation s’adapte à la production.
    - De manière automatique
    - De manière semi-automatique ou manuelle

Demand response

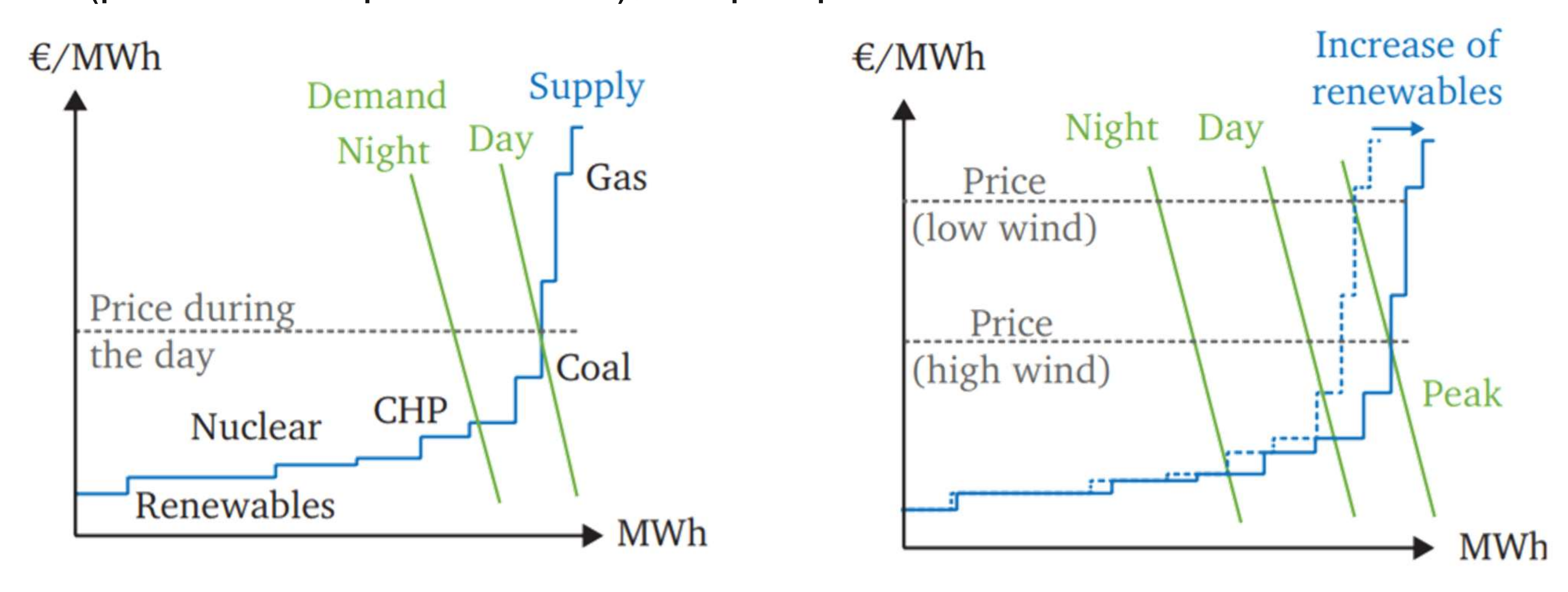
- Demand response



Demand response: implémentation du système dans une habitation [6]

Demand response

- Demand response
  - Bonne nouvelle: l'énergie renouvelable a tendance à diminuer les prix de l'électricité
  - Mauvaise nouvelle: quand l'énergie renouvelable n'est pas disponible (pas de vent, pas de soleil), les prix peuvent s'envoler



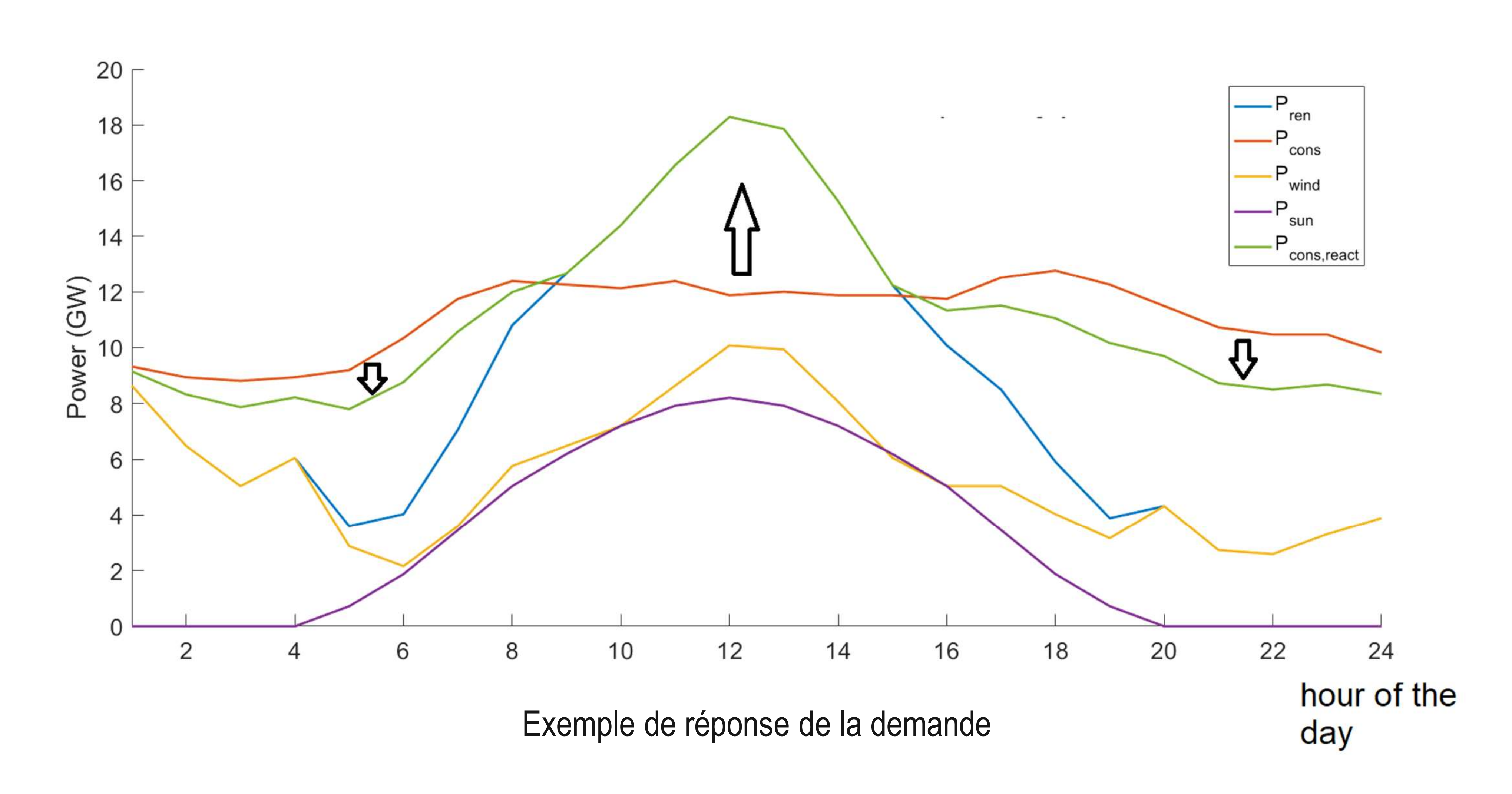
Le prix varie en fonction de la demande [6]

Demand response

- Demand response
  - Idée: inciter à consommer lorsque l’énergie renouvelable est présente
  - L’incitant à adopter ce comportement est le prix
  - Lorsque les énergies renouvelables produisent, le prix a tendance à diminuer sur le marché ➔ si le prix est communiqué aux consommateurs, ils peuvent adapter leur consommation
    - Manuellement par des notifications et une réaction du consommateur lui-même
    - Automatiquement via un système de gestion intégré
  - Largement facilité par la présence d’un compteur intelligent

Demand response

- Demand response



Exemple de réponse de la demande

Demand response

- En Belgique
  - projet LINEAR (2009-2014)
    - 185 maisons résidentielles équipées
    - 110 maisons avec compteurs intelligents
    - 400kWc de panneaux photovoltaïques
    - Projet précurseur démontrant la faisabilité technique de la demand response et l'intérêt pour l'intégration d'énergie renouvelable
  - Il y a eu un creux après le projet LINEAR
  - Désormais, il y a un regain d'intérêt sur le domaine, favorisé par l'arrivée des smart meters dans toute la Belgique
    - Projets dans le domaine soutenu par les autorités régionales (surtout du R&D)

https://clusters.wallonie.be/tweed/fr/news/fte-6-projets-valides-soutenus-par-tweed-innovation

    - Emergence d'aggrégateurs : Next Kraftwerke (d'origine allemande), Flexcity (Veolia)

https://www.next-kraftwerke.be https://www.flexcity.energy/fr

Demand response

- Demand response : tarif dynamique
  - De nouvelles formules tarifaires commencent à émerger
  - Prix variable selon l'heure de la journée, en fonction des conditions météos, etc
  - Exemple: formule tarifaire « Dynamic » chez ENGIE (uniquement en Flandre car nécessite un smart meter…)
  - Mais la gestion reste manuelle actuellement ➔ avantageux uniquement si l'on dispose d'une « grosse » charge électrique aisément planifiable (véhicule électrique, chauffage par accumulation, etc)

https://www.engie.be/fr/tarif-dynamic/

Stockage de l'énergie

- 1 Intermittence
- 2 Demand response
- **3 Stockage d'énergie vs réserve de puissance**
- 4 Batteries
- 5 Energie hydraulique et stockage
- 6 Air comprimé
- 7 Hydrogène & P2G

Stockage d’énergie ou réserve de puissance

- Stockage
  - Différentes technologie de stockage:
    - Stockage électrochimique sur batteries
    - Stockage hydraulique
    - Stockage thermique
    - Hydrogène
    - Flywheel
    - Air comprimé
    - Supercapacités
    - Power-to-gas
  - Toutes les technologies ne permettent pas de répondre au besoin de stockage d’énergie.

Réserve de puissance

- Flywheel: énergie cinétique
  - alimenter un moteur électrique à grande vitesse (> 20 000 tr/min) avec rotor de grande masse
  - Nécessite de limiter les frottements au maximum
  - Energie faible: quelques 10 kWh
  - Puissance élevée: quelques MW
  - Temps de réponse court

  - ➔ pas adapté au stockage de l'énergie électrique pour pallier à l'intermittence
  - Plutôt pour assurer des pointes de puissances très courtes
  - Application: récupération d'énergie de freinage (train, métro, etc)

Réserve de puissance

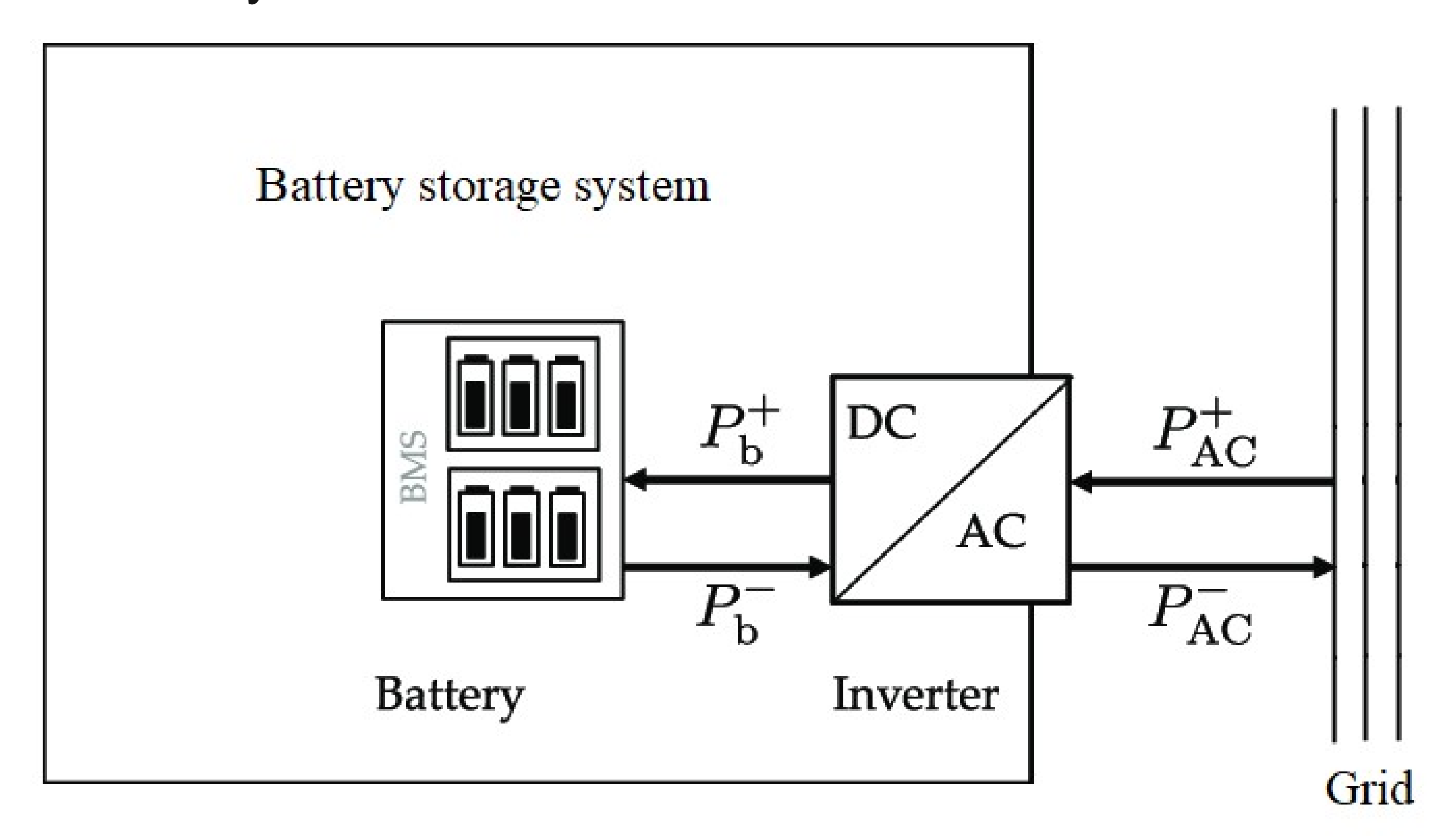
- Supercapacités: énergie potentielle électrostatique
  - Charger une capacité de grande valeur
  - Energie reste faible: quelques Wh/kg
  - Trop faible pour le stockage d’électricité également

Stockage de l'énergie

- 1 Intermittence
- 2 Demand response
- 3 Stockage d'énergie vs réserve de puissance
- **4 Batteries**
- 5 Energie hydraulique et stockage
- 6 Air comprimé
- 7 Hydrogène & P2G

Batteries

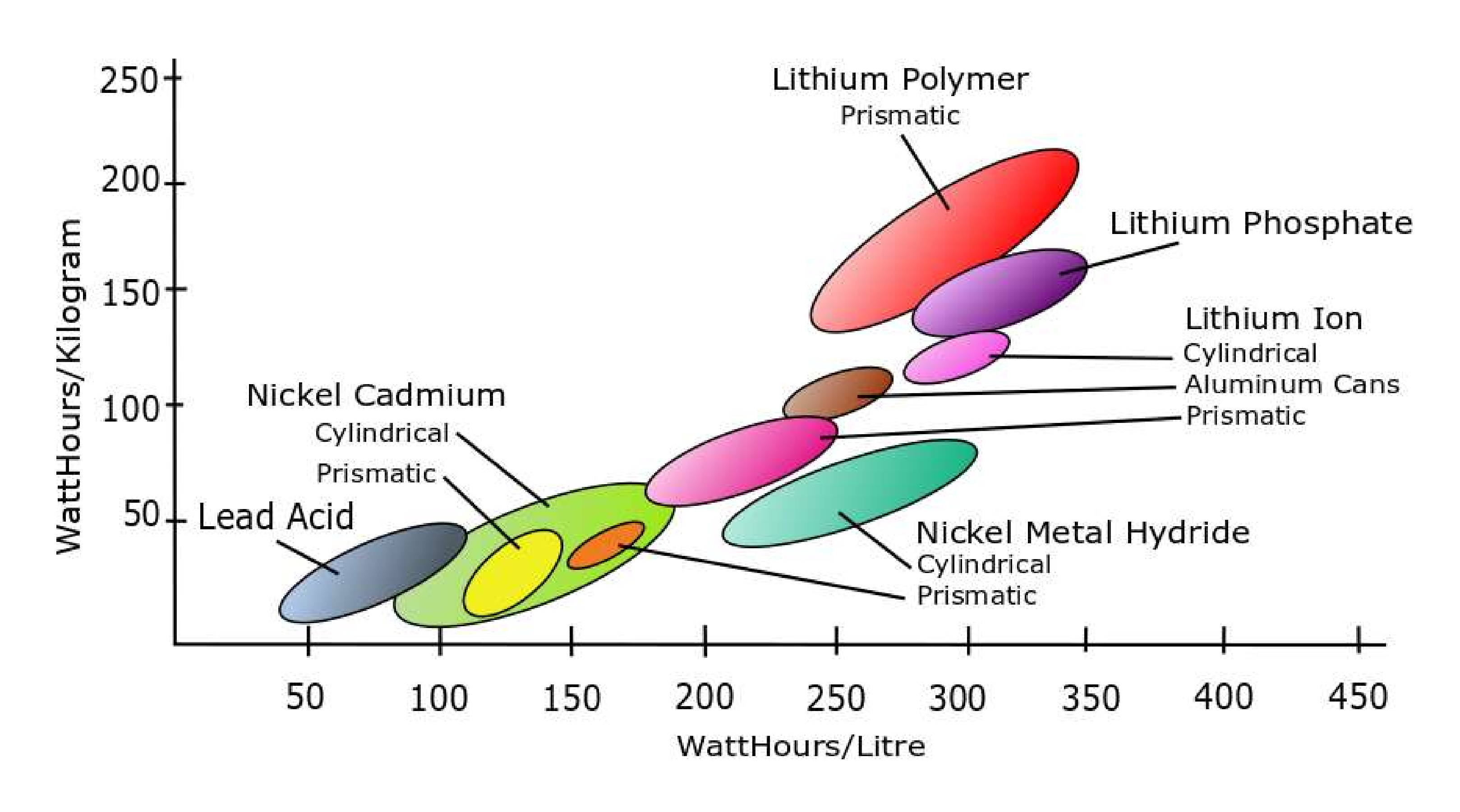
- Batteries: système



Système de stockage basé sur des batteries [7]

Batteries

- Batteries: technologies



Technologies de batteries [8]

Batteries

- Batteries: quelques chiffres
  - Densité d'énergie 200 Wh/kg
  - Pour un système de stockage permettant de stocker l'énergie d'une éolienne de 6MW pendant une heure: 30 tonnes de batteries !
  - Densité de puissance pour Li-Ion: 1000W/kg
  - Rendement cycle: 90%
  - Temps de réponse très rapide: <1s
  - Nombre de cycles de charge-décharge: environ 1000 pour Li-Ion
    NB: la batterie peut être utilisée plus longtemps. Après 1000 cycles, la capacité de la batterie Li-Ion a environ diminué de 20-25%

Batteries

- Intégration de batteries en Belgique
  - Projets en Belgique: Estor-Lux (Bastogne) et Corsica Sole (Deux-Acren)
  - Bastogne
    - 10 MW / 20 MWh
    - Opérationnel depuis le 9 décembre 2021
  - Corsica Sole
    - 50 MW / 100 MWh
    - Opérationnel depuis automne 2022
  - 2 projets TotalEnergies : 1 en phase finale et un autre pour 2025
    - 50 MW / 150 MWh
    - Anvers et Feluy
  - Multiplication par 10 d'ici 2 ans !

https://estor-lux.be/Estor-Lux-lancement-parc-de-batteries.pdf
https://www.renouvelle.be/fr/stockage-denergie-en-europe/
https://corporate.totalenergies.be/fr/totalenergies-presente-son-1er-parc-de-batteries-en-belgique-et-poursuit-ses-activites
https://www.renouvelle.be/fr/parcs-de-batteries-une-capacite-bientot-decuplee-en-belgique/

Stockage de l'énergie

- 1 Intermittence
- 2 Demand response
- 3 Stockage d'énergie vs réserve de puissance
- 4 Batteries
- **5 Energie hydraulique et stockage**
- 6 Air comprimé
- 7 Hydrogène & P2G

Hydro-électricité

- Types de centrales :
  - Centrales de lacs : temps de vidage T>200h
    ex: centrale électrique de Serre-Ponçon (380MW)
  - Centrales d'éclusées : temps de vidage 2h<T<200h

  Permettent de lisser l'intermittence mais ne permettent de stocker un surplus de production

  - Centrales d'accumulation par pompage
    ex: Coo (1.08GW et 5GWh)

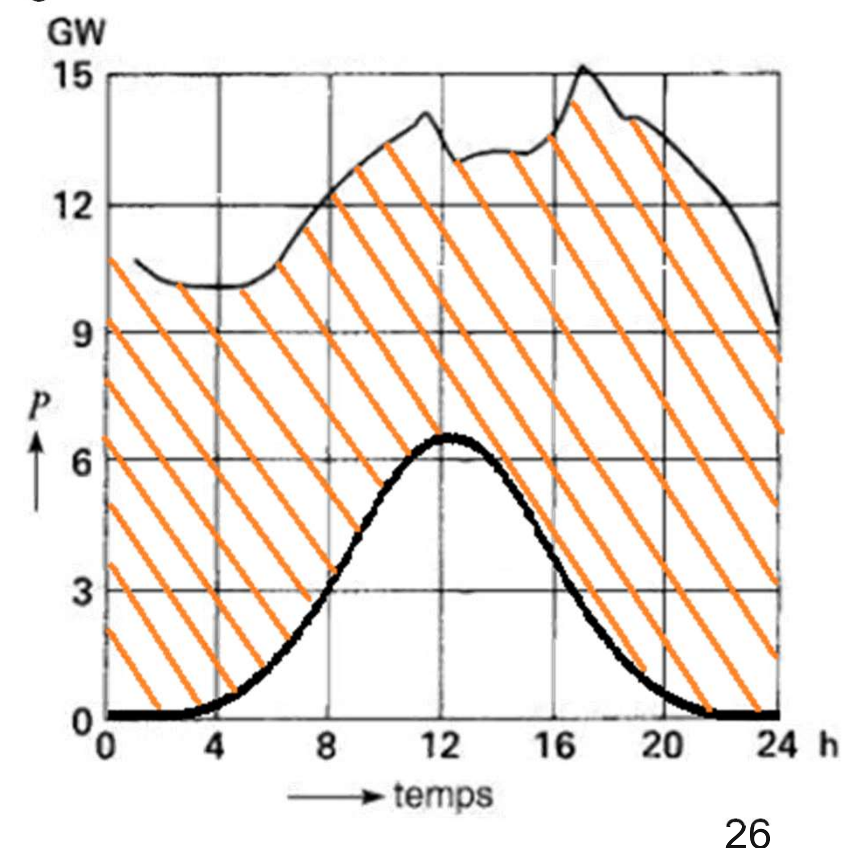
  → Le plus gros stockage en Belgique

  - Centrales au fil de l'eau: temps de vidage T<2h
    ex: Rhône (19 centrales pour environ 3GW)
  - Hydrolienne, énergie marémotrice, houlomotrice

  Pas adaptées au stockage

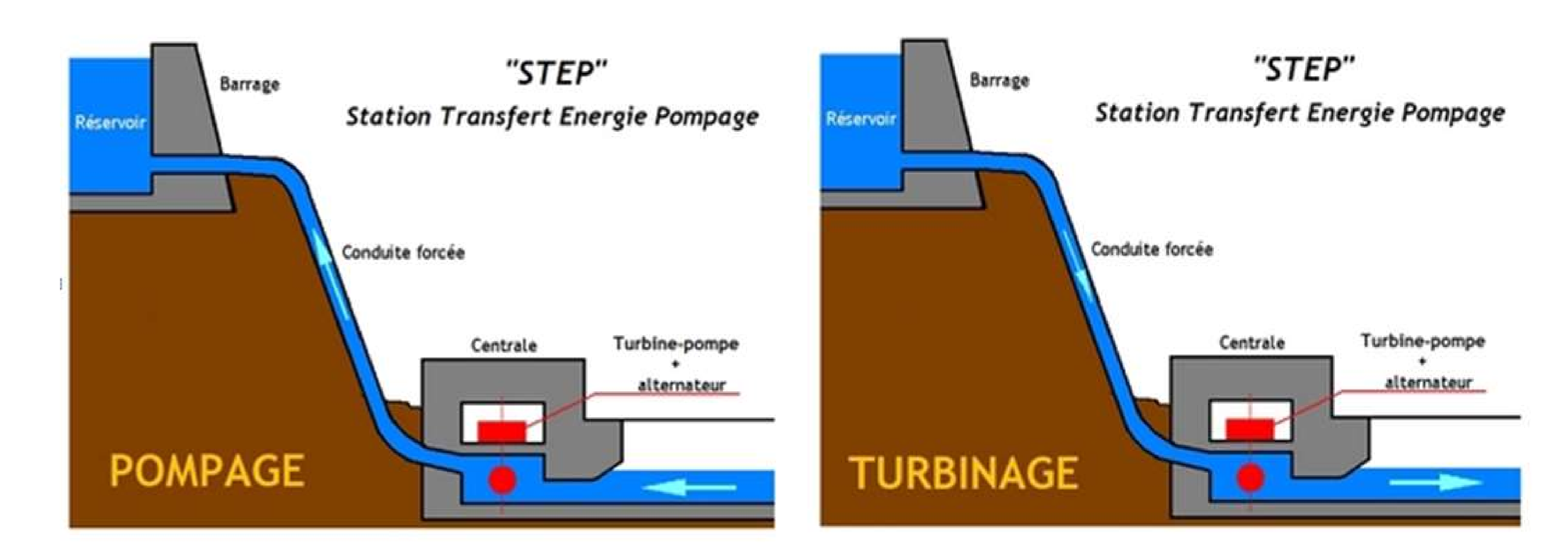
Hydro-électricité

- Types de centrales :
  - Centrales de lacs : temps de vidage T>200h
    ex: centrale électrique de Serre-Ponçon (380MW)
  - Centrales d'éclusées : temps de vidage 2h<T<200h
  - Gestion de l'intermittence:
    Solaire + hydraulique
    (hydraulique en grande quantité)
  - Pas une solution pour
    stocker le surplus de production



Hydro-électricité

- Stockage hydraulique : pompage-turbinage ou STEP
  - Monde: ~160GW
  - Europe: ~45GW (F: 6 GW, B: 1,1 GW)



Station STEP: pompage et turbinage [1]

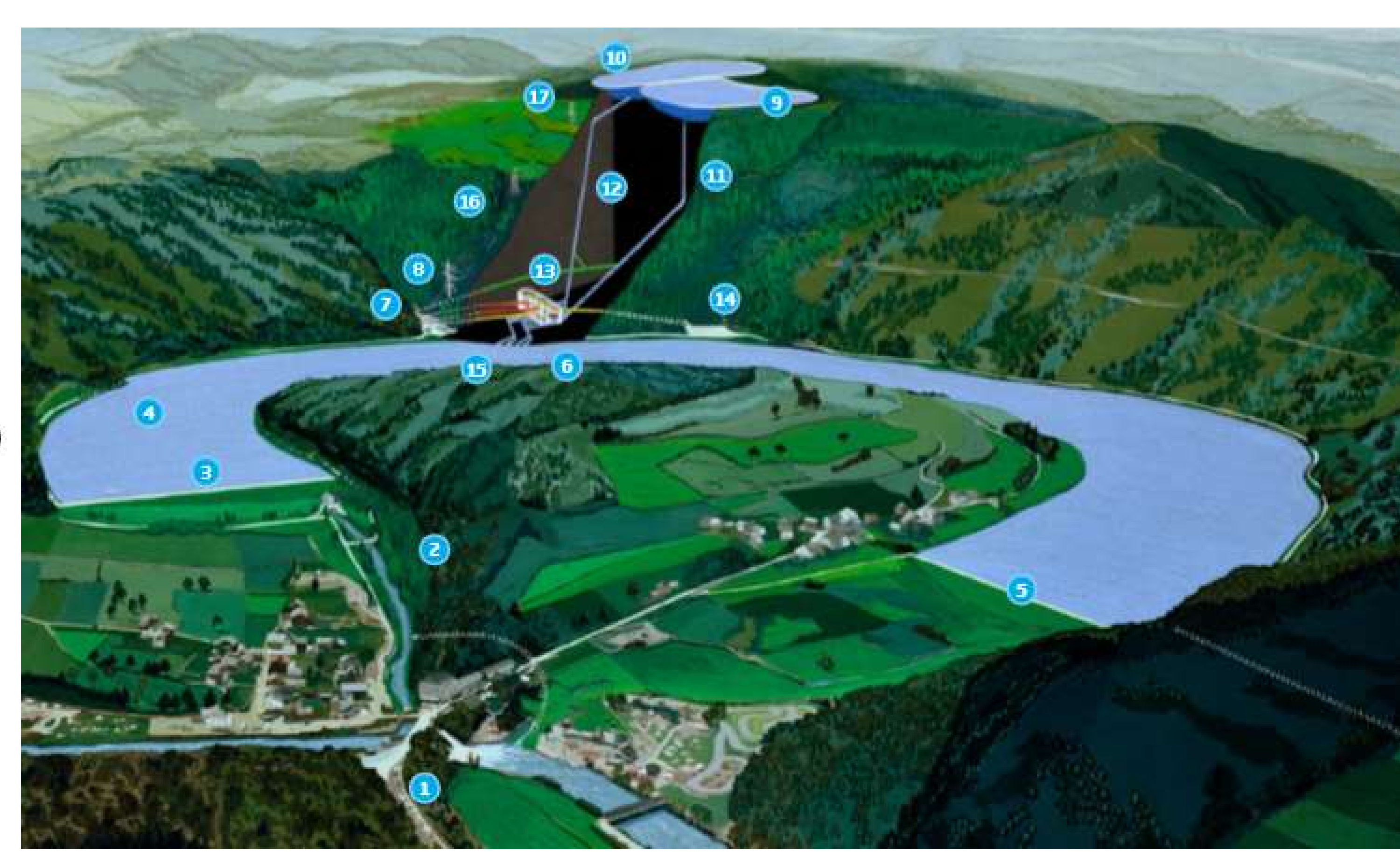
Hydro-électricité

- Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP). Pumped Storage Power Plant (PSP)
  - Composées de deux bassins situés à des altitudes différentes, elles permettent de stocker de l'énergie en pompant l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur.
  - Contribuent à maintenir l'équilibre entre production et consommation sur le réseau électrique en limitant les coûts de production lors des pics de consommation
  - Potentiel d'utilisation:
    - soit journalier (stockage de quelques heures de production)
    - soit hebdomadaire (stockage pour production en continu)
  - Bon rendement : de 70 à 85%
  - Temps de réaction: quelques 10s à quelques minutes
  - NB: possibilité de STEP mixte avec un apport d'eau extérieur

Hydro-électricité

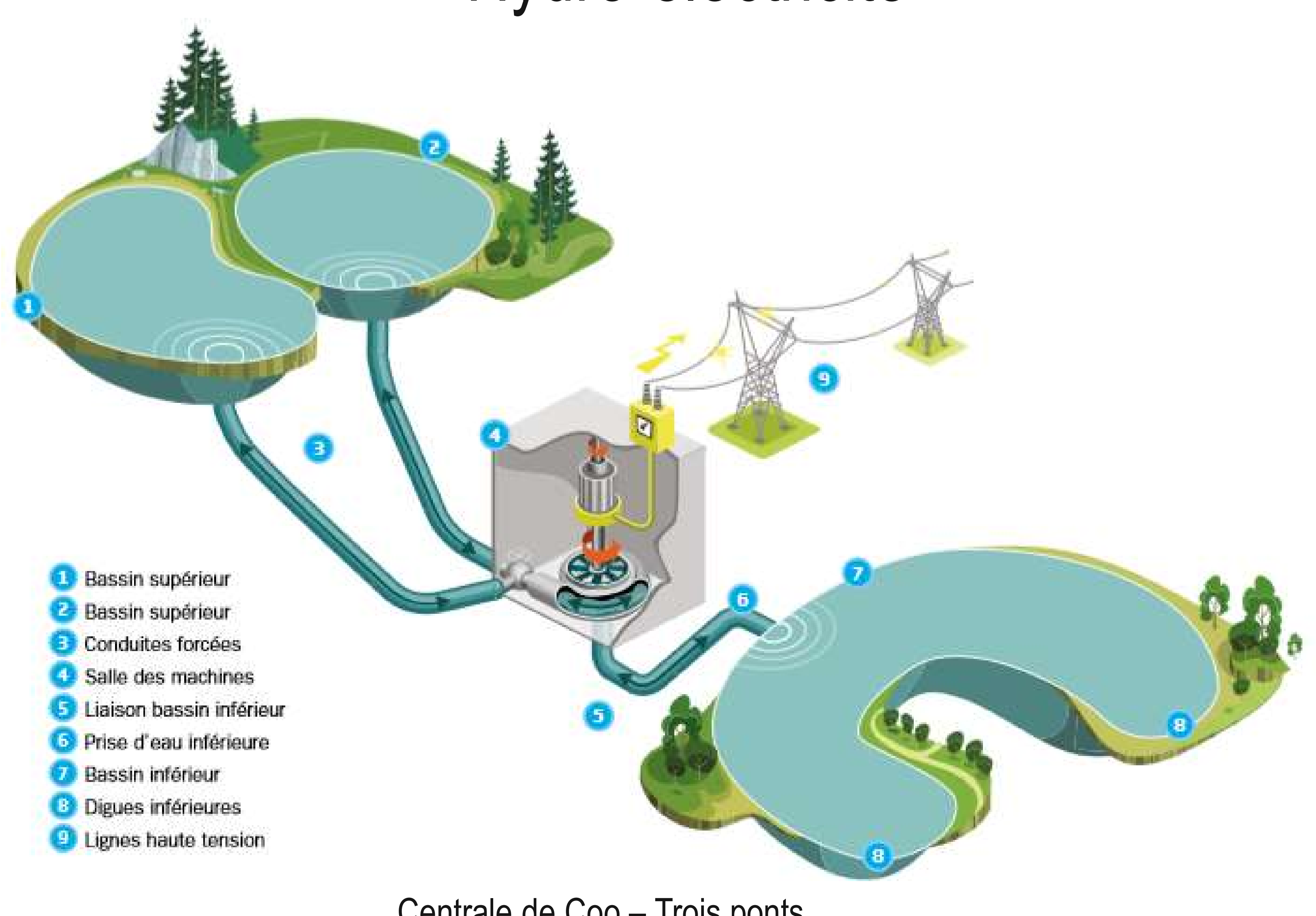
- Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP)

1. Cascade de Coo
2. Centrale hydroélectrique de Coo dérivation
3. Digue amont
4. Bassin inférieur (8 540 000 m³)
5. Digue aval
6. Prise d'eau inférieure
7. Transformateur 20/380 kV
8. Groupe diesel de secours
9. Bassin supérieur 1 (4 000 000 m³)
10. Bassin supérieur 2 (4 540 000 m³)
11. Conduite d'amenée 1
12. Conduite d'amenée 2
13. Salle des machines
14. Galerie des visiteurs
15. Liaisons bassin inférieur
16. Ligne haute tension 380 kV
17. Poste 380 kV de Brume
18. Route d'accès à la centrale



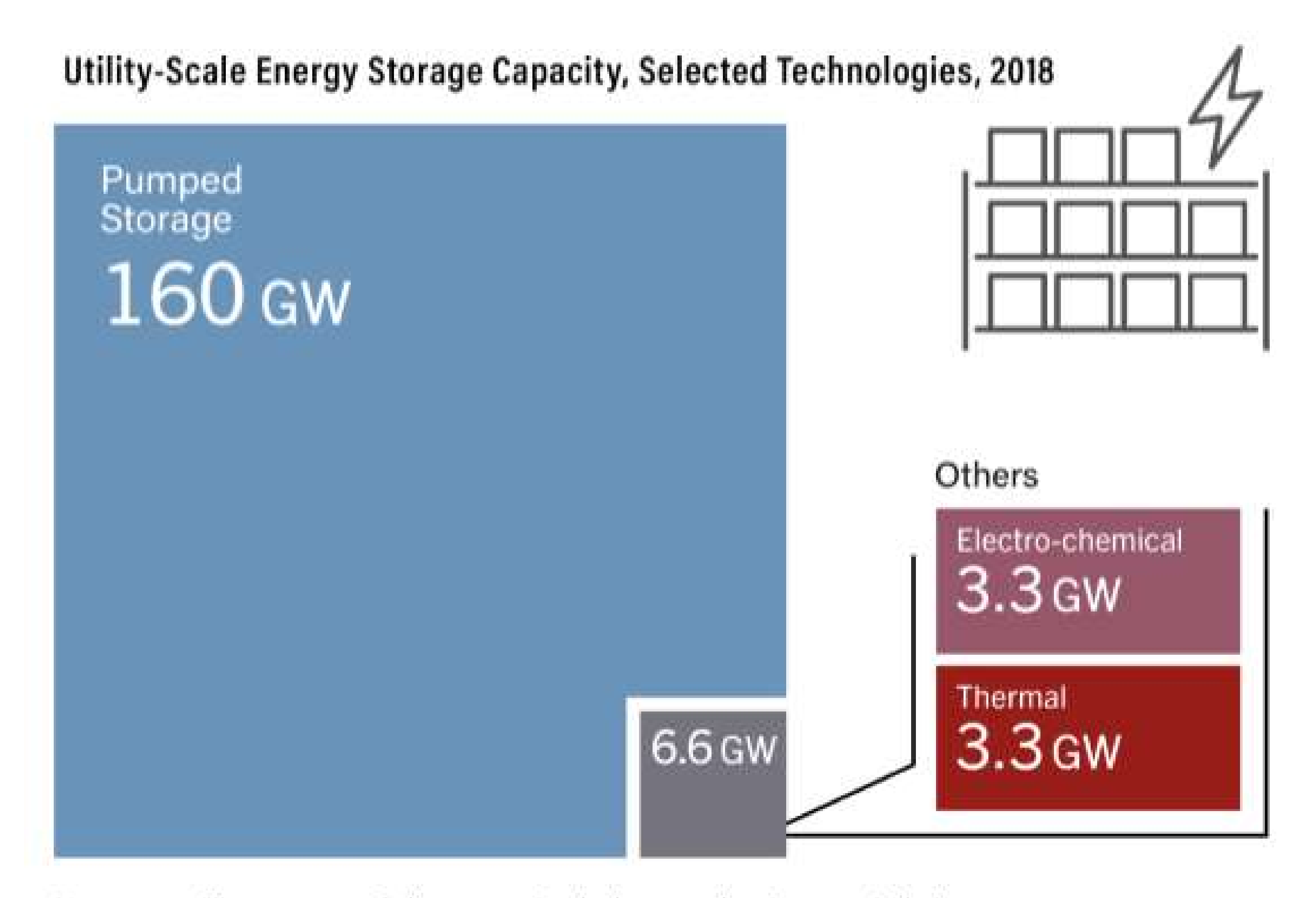
Centrale de Coo – Trois ponts

Hydro-électricité



Centrale de Coo – Trois ponts

Hydro-électricité



Capacité de stockage

Hydro-électricité

- Augmentation de la capacité de stockage et de puissance de Coo
  - 1080 MW ➔ 1159 MW
  - 6000 MWh ➔ 6450 MWh (attention, énergie sans considérer rendement de conversion ici)
  - Fin des travaux prévue pour 2025

https://business.engie.be/fr/blog/energy-market/fonctionnement-centrale-de-pompage-turbinage-de-coo/

Stockage de l'énergie

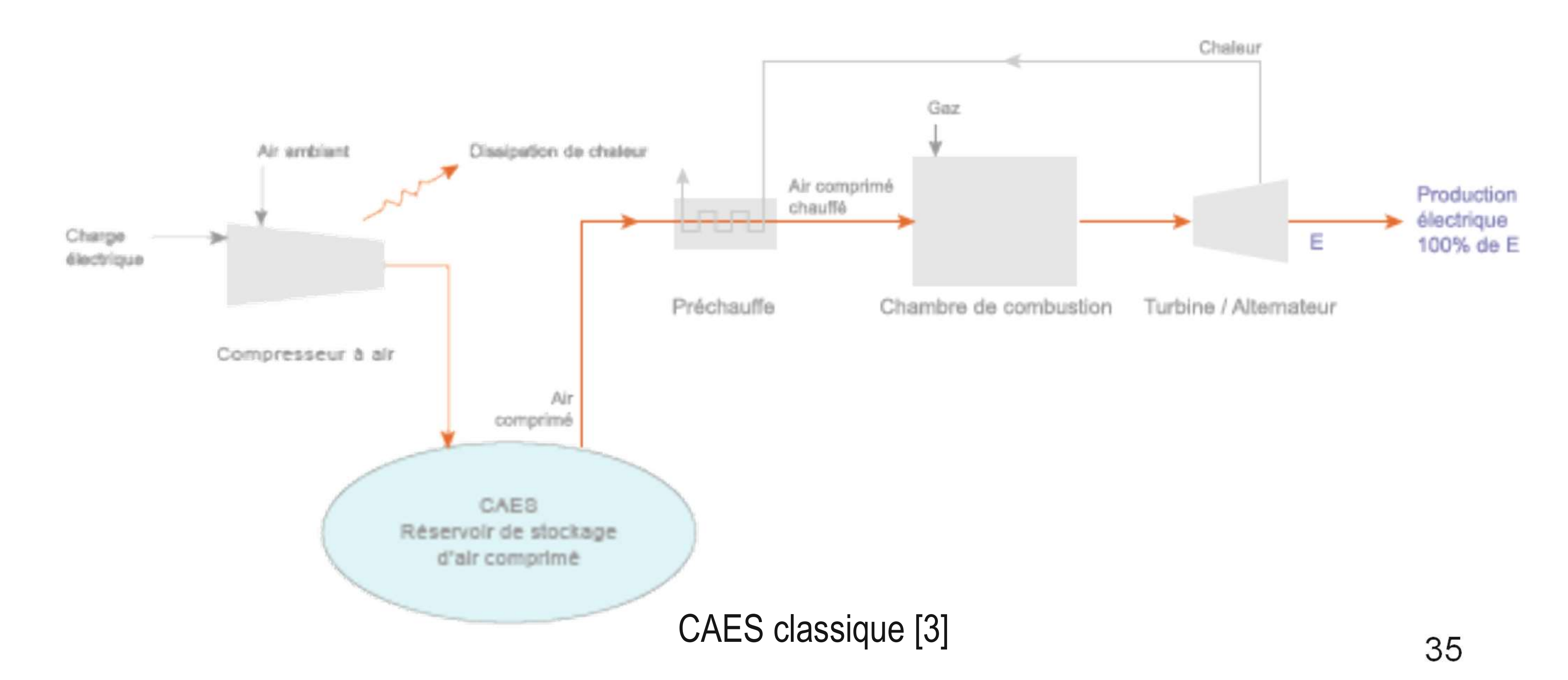
- 1 Intermittence
- 2 Demand response
- 3 Stockage d'énergie vs réserve de puissance
- 4 Batteries
- 5 Energie hydraulique et stockage
- **6 Air comprimé**
- 7 Hydrogène & P2G

Air comprimé

- Air comprimé: énergie potentielle
  - CAES: Compressed Air Energy Storage
  - Alimenter des compresseurs à air
  - Récupération par turbinage
  - Compression d'un gaz: génération de chaleur importantes
  - Rendement: 50 à 70% (fonction du type de procédé)
  - Procédé expérimental: rendement > 80%
  - Energie potentielle de pression: $\Delta P.V$
    Pour un $\Delta P = 200 bars$, on stocke 5.6kWh/m^3
    ➔Il faut de gros volumes pour que cela ait du sens pour le stockage d'énergie électrique: cavités souterraines naturelles ou mines désaffectées
  - Technologie assez ancienne (première installation: 1979). Elle connait un regain d'intérêt avec l'amélioration des rendements

Air comprimé

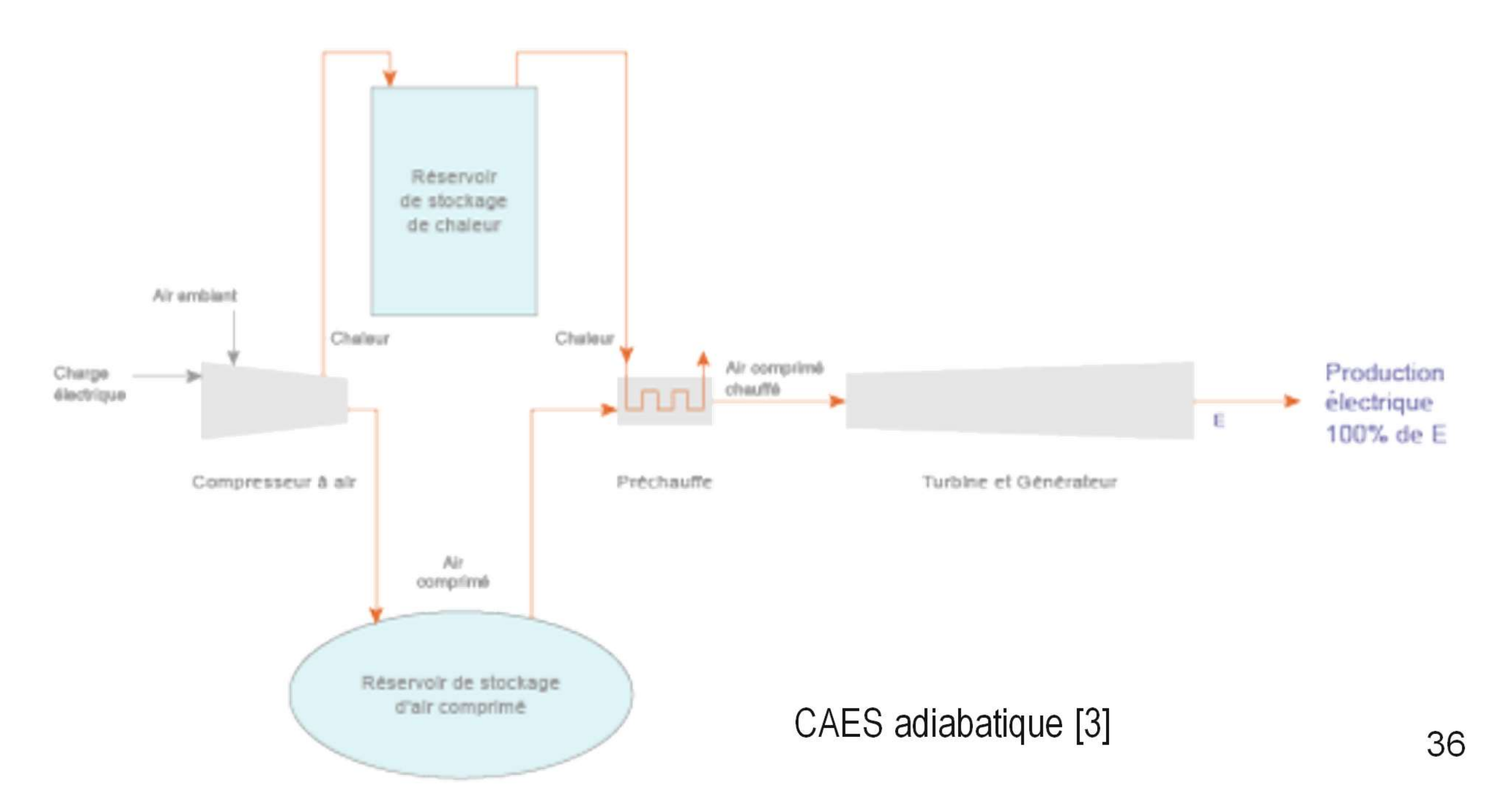
- Procédé classique
  - Rendement cycle faible: 50%
  - Pertes de chaleur à la compression
  - Nécessité de chauffer l'air au turbinage (sinon condensation)



CAES classique [3]

Air comprimé

- Procédé adiabatique
  - Récupération de la chaleur générée à la compression
  - Rendement cycle meilleur: 70%



CAES adiabatique [3]

Air comprimé

- Procédé isotherme (au stade expérimental actuellement)
  - Même principe que le système adiabatique: récupération de la chaleur générée à la compression
  - Mais échange de chaleur isotherme au cours de la compression pour augmenter le rendement
  - Défi technologique car il faut un échange de chaleur efficace pendant la compression (un transfert de chaleur isotherme n’est jamais parfaitement atteint en pratique)
  - Rendement cycle > 80 %
  - Encore à confirmer…

Air comprimé

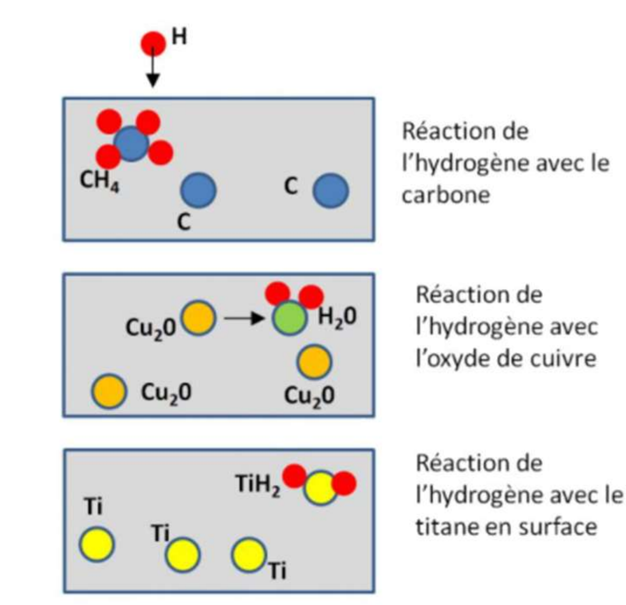
- Projets existants ou en cours (non-exhaustif)
  - Huntorf en Allemagne : 290 MW en 1979, 3h de stockage
  - McIntosh aux États-Unis (Alabama): 110 MW en 1991, 26h de stockage
  - L'installation Hydrostor au Canada (Toronto): 500MW en 2014, 4h de stockage
  - le projet de Pacific Gas & Electricity aux États-Unis (Californie): 300 MW en cours de développement,10h de stockage

Stockage de l’énergie

- 1 Intermittence
- 2 Demand response
- 3 Stockage d’énergie vs réserve de puissance
- 4 Batteries
- 5 Energie hydraulique et stockage
- 6 Air comprimé
- **7 Hydrogène & P2G**

Hydrogène

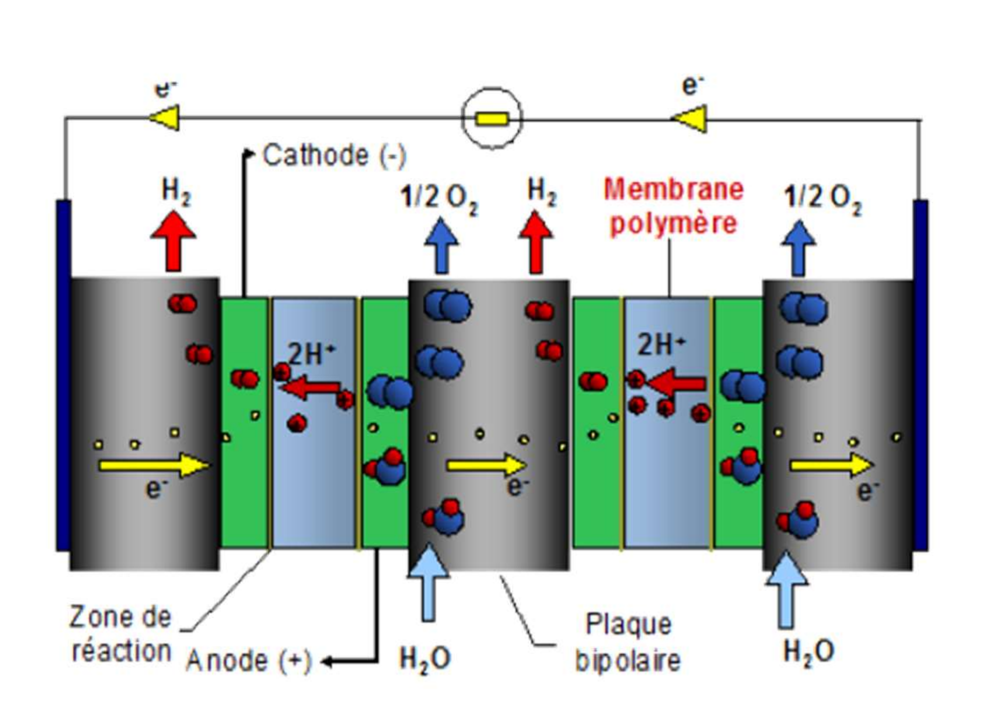
- Caractéristiques
  - Gaz non toxique
  - Très énergétique
  - Permet de faire fonctionner des moteurs à combustion interne (rejet: H_2O)
  - Pas disponible sous forme non combinée naturellement
  - Risque de fuite élevé car perméable à travers des matériaux
  - Fragilisation de matériaux métalliques
  - Faible énergie d'inflammation
  - Domaine d'inflammation très étendu
  - Flamme peu visible
  - Risque de détonation (ondes de choc)

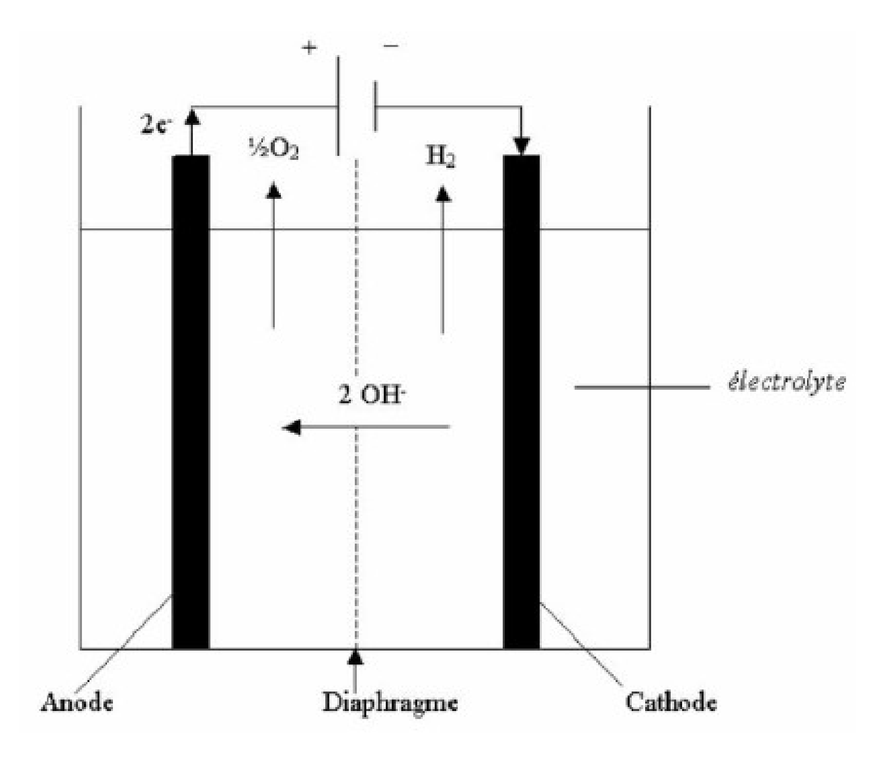


Interactions métal hydrogène [10]

Hydrogène

- Formation
  - Par reformage du méthane à la vapeur d'eau
  - Par électrolyse





Electrolyse PEM et alcaline [2]

Hydrogène

- Utilisation
  - transformation directe en électricité
    - pour alimenter des réseaux électriques centralisés
      ex: projet MYRTE en Corse
    - pour alimenter des réseaux électriques décentralisés
      ex: alimentation d'habitats isolés (îles)
      ex: stations services pour véhicules à H_2
  - mélange au gaz naturel: mélange Hythane
    - Peut être utilisé dans les véhicules au gaz directement
    - max 20 à 30% de H_2
    - Carburant moins carboné donc moins de CO_2
  - fabrication d'un combustible par réaction chimique avec un produit carboné

Hydrogène

- Utilisation:
  - projet MYRTE: étude du couplage d'une énergie solaire intermittente au réseau de distribution électrique (Corse)
  - centrale solaire photovoltaïque: 550kWe
  - chaîne Hydrogène
    - électrolyseur (type PEM)
    - stockage d'H_2
    - piles à combustible PEM (3x 60 kWe)



Projet MYRTE [9]

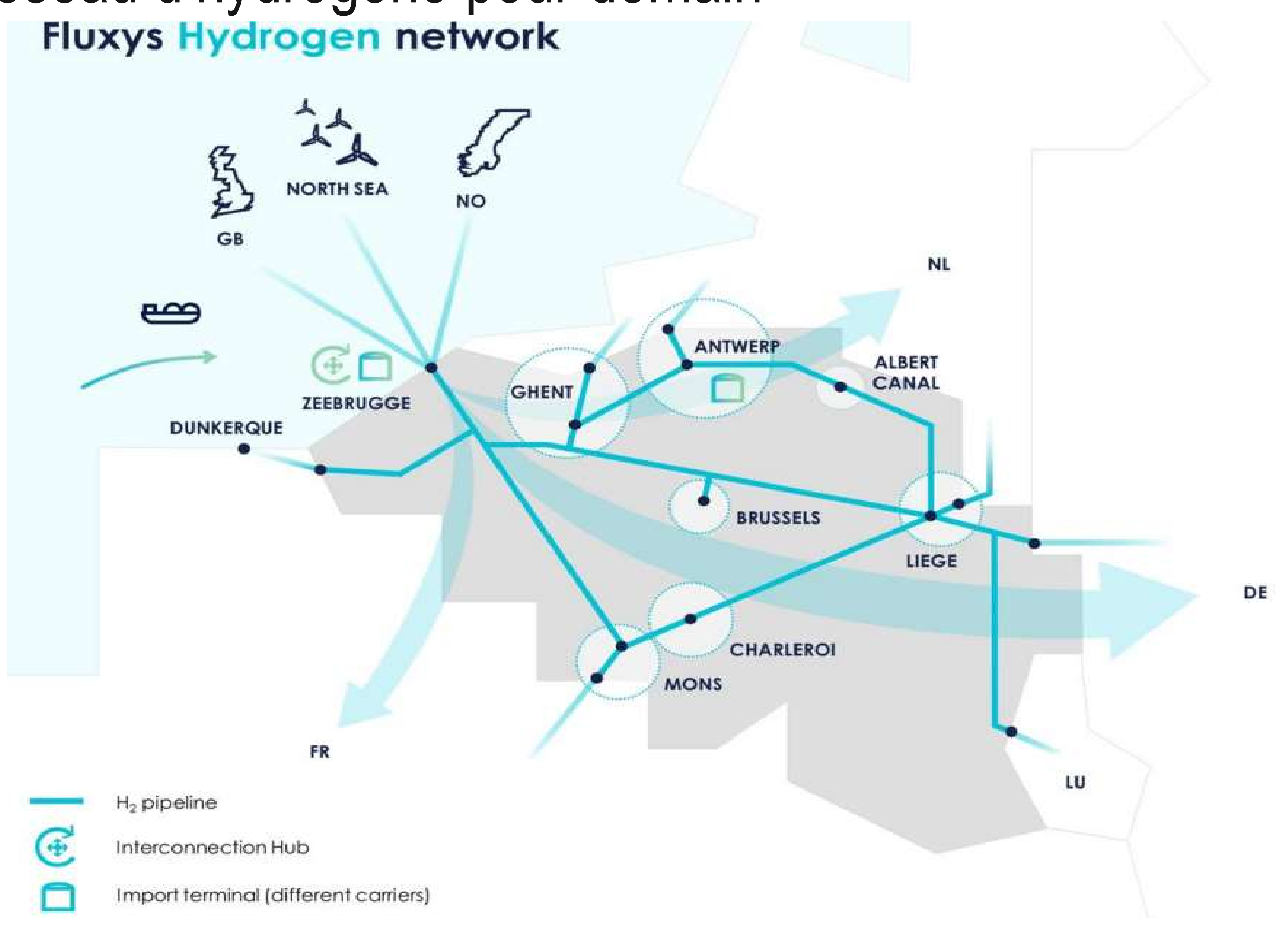
Hydrogène

- Production en Belgique
  - En Belgique, premier projet « Hyoffwind » à ZeeBruges
  - 25 MW électrolyseur
  - Pour 2026
  - Ambition d'augmenter la capacité à 100 MW

https://virya-energy.prezly.com/virya-energy-hyoffgreen-and-messer-announce-final-investment-decision-for-25mw-renewable-hydrogen-plant-in-zeebrugge-paving-the-way-for-sustainable-mobility-and-industry

Hydrogène

- Un réseau d'hydrogène pour demain



https://www.fluxys.com/en/about-us/fluxys-hydrogen

P2G

- P2G: Power to gas
  - Stockage d'énergie sous forme de méthane
  - Utilisation du surplus de production d'électricité pour produire, par électrolyse de H_2 et O_2
  - Isolation de H_2
  - Production de méthane à partir de H_2 et CO_2
  - Stockage dans le réseau de gaz naturel existant
  - H_2 peut aussi être directement réinjecté dans le réseau de gaz (hythane)

P2G

- P2G: Power to gas

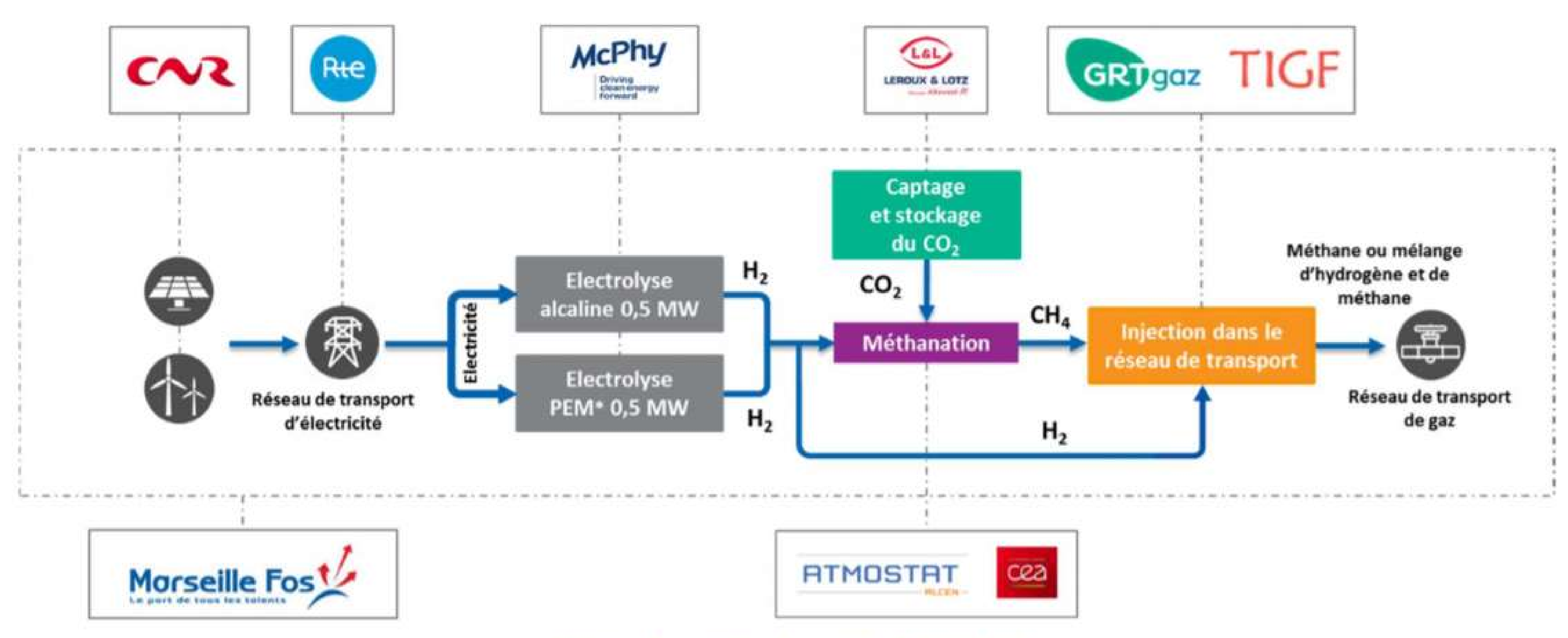


Schéma de principe du projet « JUPITER 1000 »

H_2 : Hydrogène CH_4 : Méthane CO_2 : dioxyde de carbone

https://www.youtube.com/watch?v=KfVsW1n2_Hw

Références bibliographiques

- [1]: http://www.hydroelec.fr/13.html
- [2]: association française pour l’hydrogène et les piles à combustible: http://www.afhypac.org/fr/accueil
- [3]: https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime
- [4]: Elia: http://www.elia.be
- [5]: Electrotechnique Th. Wildi –G. Sybille
- [6]: Mattlet B., *Potential Benefits of load flexibility: A focus on the future Belgian distribution system*, PhD thesis, ULB, 2018.
- [7]: Hesse H. et al, *Ageing and Efficiency Aware Battery Dispatch for Arbitrage Markets Using Mixed Integer Linear Programming,* in energies, 2019.
- [8]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Batterie_d%27accumulateurs
- [9]: https://www.smartgrids-cre.fr/projets/myrte
- [10]: https://metalblog.ctif.com/2021/01/04/la-fragilisation-par-lhydrogene-des-metaux/